

## 激光与光电子学进展

## 基于边界寻找算法的高温复杂流场区域划分

程伟昊<sup>1,3</sup>, 陈云云<sup>1,2,3\*</sup>, 陈雅宜<sup>1,3</sup>, 徐梦<sup>1,3</sup><sup>1</sup>南京信息工程大学物理与光电工程学院江苏省大气海洋光电探测重点实验室, 江苏 南京 210044;<sup>2</sup>南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;<sup>3</sup>南京信息工程大学江苏省气象光子学与光电探测国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044

**摘要** 在利用莫尔层析技术测量高温复杂流场关键物理参数时,流场的区域划分能够更好地确定成分,这对确保测量精度显得尤为重要。考虑到实际被测流场结构的复杂性,提出了一种自动寻找流场边界的算法对高温复杂流场进行区域划分。为验证算法的有效性和合理性,选取两类典型流场(氩弧等离子体和丙烷-空气火焰流场)进行了实验验证。结果表明,此算法可以显著提高流场区域划分的效率和精度,相关研究成果可以为结构较为复杂的流场重建问题提供一定的基础和思路。

**关键词** 边界寻找; 区域划分; 莫尔层析技术; 复杂流场重建

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213184

## Region Division of High-Temperature Complex Flow Fields Based on Boundary Searching Algorithm

Cheng Weihao<sup>1,3</sup>, Chen Yunyun<sup>1,2,3\*</sup>, Chen Yayi<sup>1,3</sup>, Xu Meng<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Jiangsu Key Laboratory for Optoelectronic Detection of Atmosphere and Ocean, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology,

Nanjing 210044, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;<sup>3</sup>Jiangsu International Joint Laboratory on Meteorological Photonics and Optoelectronic Detection, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

**Abstract** When Moiré tomography is applied to measure the temperature of complex flow fields, a partition reconstruction method is used to minimize the influence of species composition on the results obtained, which is essential to ensure measurement accuracy. Considering the complexity of flow field structures, a boundary searching algorithm is proposed in this study to automatically divide the regions of the measured high-temperature complex flow fields. A propane-air flame and an argon arc plasma are used to verify the feasibility of the proposed algorithm. The results show that this algorithm can simultaneously improve the calculation efficiency and accuracy of boundary search in the divided flow field regions. This study provides a foundation for widening the range of applications of Moiré tomography.

**Key words** boundary search; region division; Moiré tomography; flow field reconstruction

## 1 引言

莫尔层析技术是一种重要的高温复杂流场探测方法,其在流场诊断等领域提供了许多有效的方法和数据<sup>[1-3]</sup>。实验中,首先获得的是记录了待测流场折射率信息的莫尔条纹<sup>[4-5]</sup>,通过条纹预处理<sup>[6]</sup>、相位信息提取<sup>[7-8]</sup>、折射率重建<sup>[9-11]</sup>等过程可最终提取出待测流场

的折射率信息。然后,根据现有的折射率与流场关键参数(如温度、粒子数密度等)之间的关系<sup>[12]</sup>,即可反演出待测流场的关键参数。值得注意的是,不同流场的结构和成分会有不同,因此在上述获取关键参数过程中,不同成分的确会影响计算过程中具体数值的选取。所以,在反演流场关键参数之前,需要将待测流场进行区域划分,在此基础上确定每个区域的流场成分,

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-02-15; 录用日期: 2022-02-25; 网络首发日期: 2022-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61975083)、江苏省研究生科研创新计划(KYCX21\_0986)

通信作者: \*yunqq321@sina.cn

以便更好地进行关键参数的反演。

显然,要对流场进行区域划分,准确、快速地为流场确定不同成分区域之间的边界就成了重中之重。目前,相关研究表明大体有几种区域划分的方法:1)不划分区域,认为整个流场均为空气<sup>[13]</sup>或者燃烧产物<sup>[14-15]</sup>,即假设整个流场的成分是均匀的,但这不符合实际情况;2)根据相位分布对流场进行区域划分<sup>[16]</sup>;3)根据亮度和折射率分布对流场进行区域划分<sup>[17]</sup>。值得注意的是,在后两种已有的分区重建法中,不同区域之间的边界均是根据观察流场相位或亮度和折射率发生突变的点进行近似确定的。

因此,为了提高分区重建过程的效率和精度,本文提出了边界寻找算法,并使用计算机自动寻找边界,在此基础上实现对高温复杂流场的自动区域划分。

## 2 基本原理

分区重建法根据流场的折射率和亮度分布来划分流场区域并在不同的区域分别进行流场重建<sup>[17]</sup>。可以

发现,流场的折射率和亮度曲线在高温等特殊条件下变化幅度较大,但在周围参考空气区域几乎没有变化,并且曲线只会连续增大或减小,不会频繁上下抖动,由此产生一种边界寻找算法。曲线大幅变化的连续部分可以视为一个“峰”,且其起始点和结束点位置决定了其所属区域的边界。

设待处理曲线为  $f_i (i = 1, 2, \dots, N)$ , 其数据点个数为  $N$ 。第  $m$  个上升部分  $u_m$  和第  $n$  个下降部分  $d_n$  的起始点分别为  $u_{lm}$  和  $d_{ln}$ , 变化幅度分别为  $u_{vm}$  和  $d_{vn}$ 。上一个变化部分的起始点处曲线值为  $c_v$ , 上述符号意义如图 1 所示。

初始化上升下降标志为上升, 遍历  $f$ 。如果  $f_i > f_{i-1}$  并且标志为下降, 则  $f_{i-1}$  为上升部分的起始点, 即

$$\begin{cases} u_{lm} = i - 1 \\ d_{v(m-1)} = f_{i-1} - c_v \\ c_v = f_{i-1} \end{cases} \quad (1)$$

上升部分的起始点示意图如图 2(a) 所示。

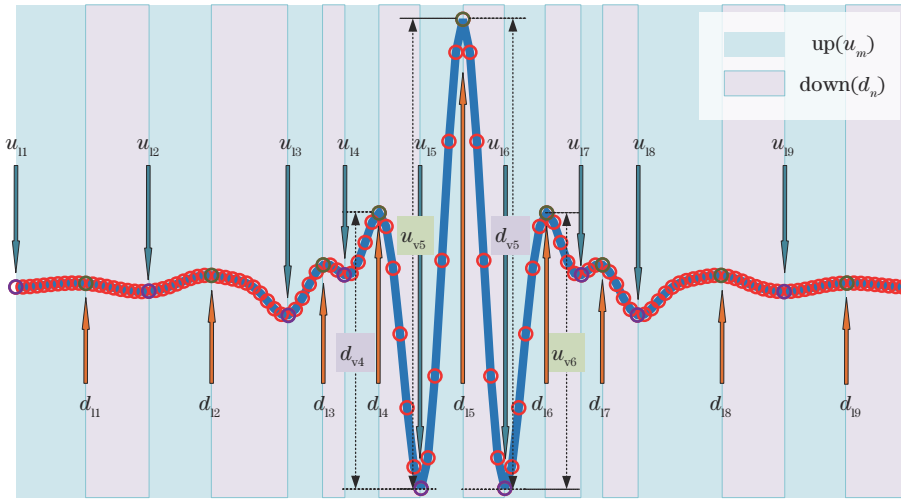


图 1 符号意义说明示意图

Fig. 1 Symbol meaning diagram

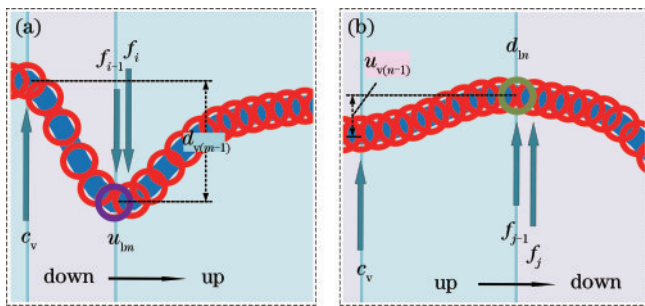


图 2 上升和下降部分示意图。(a) 上升部分; (b) 下降部分

Fig. 2 Diagrams of ascending and descending parts.

(a) Ascending parts; (b) descending parts

如果  $f_i < f_{i-1}$  并且标志为上升, 则  $f_{i-1}$  为下降部分的起始点, 即

$$\begin{cases} d_{ln} = i - 1 \\ u_{v(n-1)} = f_{i-1} - c_v \\ c_v = f_{i-1} \end{cases} \quad (2)$$

下降部分的起始点示意图如图 2(b) 所示。

遍历结束时, 最后一个变化部分只记录了起始点位置和上升下降标志, 并没有记录变化幅度, 所以需要单独对其进行计算。如果最后一个部分的标志为上升, 则  $u_v$  为  $u_{ve}$ , 且

$$u_{ve} = f_N - c_v \quad (3)$$

上升末尾部分的上升幅度示意图如图 3(a) 所示。

如果最后一个部分的标志为下降, 则  $d_v$  为  $d_{ve}$ , 且

$$d_{ve} = f_N - c_v \quad (4)$$

下降末尾部分的上升幅度示意图如图 3(b) 所示。

此时, 已经得到所有变化部分的上升点位置  $u_i$  和下

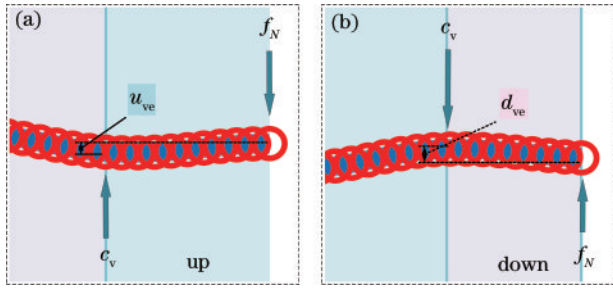


图3 末尾部分示意图。(a)上升末尾;(b)下降末尾  
Fig. 3 Diagrams of the end part. (a) Ascending end; (b) descending end

降点位置  $d_{l1}$ , 以及各自的上升幅度  $u_i$  和下降幅度  $d_{vi}$ 。由于各种不同流场结构的多样性和复杂性, 将待测流场的折射率和亮度曲线分为单峰和多峰两种类型进行讨论。

### 2.1 单峰曲线的区域划分

单峰曲线的边界寻找算法适用于轴对称的流场。由于待测流场的主体部分存在高温等特殊环境, 其折射率或亮度的变化幅度最大, 因此, 需要确定其起始点位置和变化幅度。设第  $s$  个上升部分的上升幅度最大, 第  $t$  个下降部分的下降幅度最大, 即

$$\begin{cases} u_{vmax} = u_{vs} \\ d_{vmax} = d_{vt} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u_{vmax}$  为最大上升部分的上升幅度;  $d_{vmax}$  为最大下降部分的下降幅度。

之后, 就可以得到最大上升部分和最大下降部分的起始点位置, 即

$$\begin{cases} u_{lmax} = u_{ls} \\ d_{lmax} = d_{lt} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $u_{lmax}$  为最大上升部分的起始点位置;  $d_{lmax}$  为最大下降部分的起始点位置。

虽然不确定折射率和亮度曲线先上升还是先下降, 但是总会有最大上升部分和最大下降部分。因此, 可以计算出待测流场左半部分的边界点位置  $b_{left}$ :

$$b_{left} = \min\{u_{lmax}, d_{lmax}\} \quad (7)$$

由于曲线关于中心轴对称, 右半部分边界点位置  $b_{right}$  为

$$b_{right} = N - b_{left} \quad (8)$$

上述过程中的符号意义如图 4 所示。至此, 就得

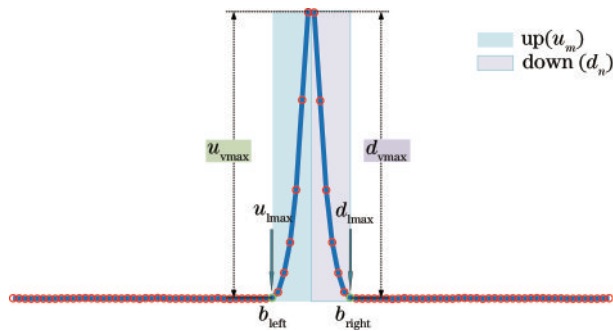


图4 单峰曲线边界寻找结果示意图  
Fig. 4 Searching results of unimodal curve boundary

到了单峰曲线两侧的边界点位置。

### 2.2 多峰曲线的区域划分

相比于单峰曲线, 多峰曲线拥有更多的峰。因此, 需要根据变化的剧烈与否对所有的变化部分进行分类。根据 Minkowski 距离的最短距离法, 对 2.1 节得到的所有变化过程的变化幅度进行聚类分析<sup>[18]</sup>。设所有变化过程的变化幅度为  $c_i$ , 则两个样本幅度间的距离可由  $q = 1$  时的 Minkowski 距离<sup>[19]</sup>来计算:

$$d(c_{ij}, c_{ik}) = |c_{ij} - c_{ik}| \quad (9)$$

变化幅度的两个样本类, 即大幅变化和微弱变化两类之间的距离用最短距离法<sup>[20]</sup>来计算:

$$D(G_p, G_q) = \min_{\substack{c_{ij} \in G_p \\ c_{ik} \in G_q}} \{d(c_{ij}, c_{ik})\} \quad (10)$$

式中:  $G_p$  为大幅变化部分的  $c_{ij}$  所属的类;  $G_q$  为微弱变化部分的  $c_{ik}$  所属的类。

上述过程中的符号意义如图 5 所示。于是, 找到了多峰曲线所有大幅变化的峰的位置和边界。

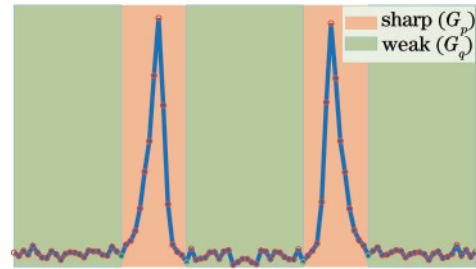


图5 多峰曲线边界寻找结果示意图  
Fig. 5 Searching results of multimodal curve boundary

## 3 边界寻找结果

选用氩弧等离子体和丙烷-空气火焰两类典型流场进行研究, 将包含待测流场折射率信息的莫尔条纹导入计算机中, 经过傅里叶变换法相位信息提取<sup>[21]</sup>、多重网格法相位解包<sup>[22]</sup>、滤波反投影法重建折射率<sup>[23]</sup>后, 就可以得到待测流场的折射率分布曲线。将流场图片进行亮度重建<sup>[17]</sup>后, 就可以得到待测流场的亮度分布。

### 3.1 氩弧等离子体

实验中记录的被测氩弧等离子体和相应莫尔条纹如图 6 所示<sup>[24]</sup>。

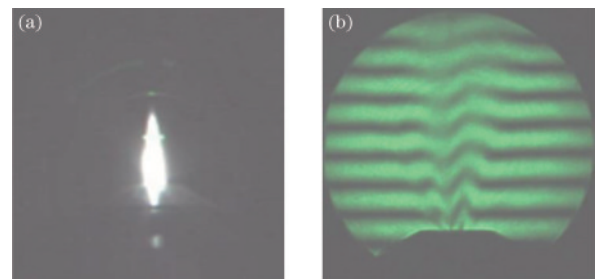


图6 实验结果<sup>[24]</sup>。(a)氩弧等离子体;(b)莫尔条纹  
Fig. 6 Experimental results<sup>[24]</sup>. (a) Argon arc plasma; (b) Moiré fringe

由亮度和折射率分布曲线,发现氩弧等离子体的亮度和折射率曲线只有一个大幅变化的峰。由于氩弧边缘处亮度过大,CCD 过度曝光,使亮度曲线中央发生较微弱的下凹,整体仍为单个完整的峰。于是,氩弧等离子体的亮度和折射率曲线均为单峰曲线。应用 2.1 节的单峰曲线边界寻找算法,可以分别确定亮度和折射率曲线的边界位置,如图 7 所示,相应的边界点用粗点标记在图中。

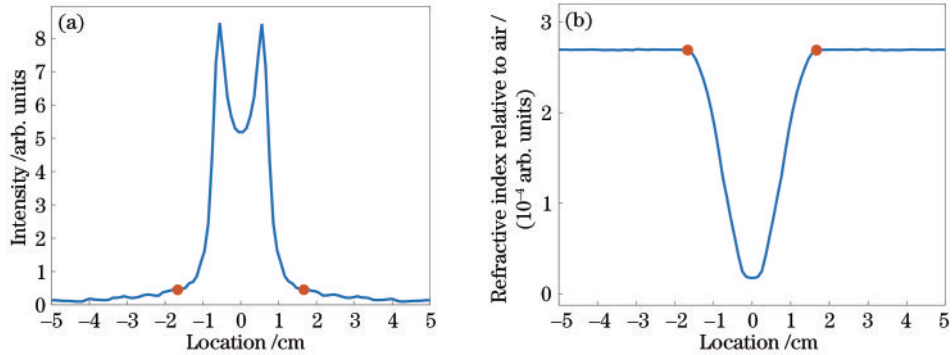


图 7 边界搜寻结果。(a)亮度;(b)折射率

Fig. 7 Boundary searching results. (a) Intensity; (b) refractive index

### 3.2 丙烷-空气火焰

丙烷-空气火焰流场的亮度图和莫尔条纹图如图 8 所示<sup>[25]</sup>。

由亮度和折射率分布曲线,发现丙烷-空气火焰的

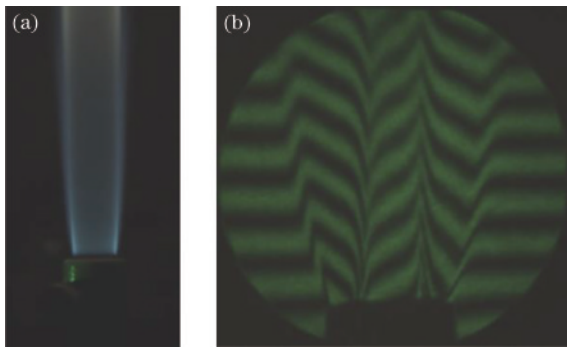


图 8 实验结果<sup>[25]</sup>。(a)丙烷-空气火焰;(b)莫尔条纹

Fig. 8 Experimental results<sup>[25]</sup>. (a) Propane-air flame; (b) Moiré fringe

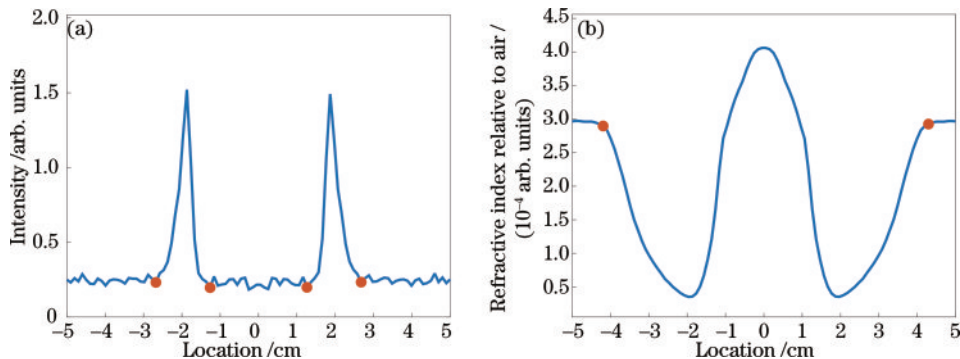


图 9 边界搜寻结果。(a)亮度;(b)折射率

Fig. 9 Boundary searching results. (a) Intensity; (b) refractive index

由图 7(a)可以发现,曲线在粗点外侧变化幅度十分微弱,并且有上下波动的现象,但是这种流场周围的扰动并没有影响到边界的寻找结果,曲线在粗点内侧大幅变化。由图 7(b)可以发现,曲线在粗点外侧十分平稳,在粗点内侧变化幅度巨大,说明粗点位置即为想要的边界位置。总之,准确地找到了单峰曲线的所有边界点位置,证明 2.1 节的单峰曲线边界寻找算法是有效的。

亮度和折射率曲线均为多峰曲线,于是应用 2.2 节的多峰曲线边界寻找算法,可以分别确定亮度和折射率曲线的边界位置,如图 9 所示,相应的边界点用粗点标记在图中。

由图 9(a)可以发现,曲线在粗点外侧变化幅度微弱,并且有十分明显的上下波动的现象,但是仍然没有影响到边界的寻找结果,曲线在两组粗点间的部分为完整的峰。由图 9(b)可以发现,曲线在粗点内侧变化幅度巨大,并且包含连续的 3 个峰。由于这连续的 3 个峰都是要重点关注的高温复杂流场部分,与外侧的周围参考空气区域的曲线变化明显不同,同时仅根据此曲线无法区分出连续峰的内部流场组分和性质的区别,所以将这 3 个连续峰的整体外边缘认为是折射率曲线的边界。总之,准确地找到了多峰曲线所有的边界点位置,证明 2.2 节的多峰曲线边界寻找算法也是有效的。

## 4 分析与讨论

由 3 节得到的氩弧等离子体流场和丙烷-空气火焰流场的亮度、折射率分布和各自的边界,即可对这 2 个待测流场进行区域划分。

### 4.1 氩弧等离子体流场

根据 3.1 节的亮度和折射率曲线的边界寻找结果,可得到氩弧等离子体流场的区域划分结果,如

图 10 所示。

由图 10 可以看出,根据亮度和折射率分布曲线可以将氩弧等离子体流场划分为 2 个区域。与之前的人工观察相比<sup>[24]</sup>,本文提出的流场边界寻找算法计算时间为 0.218432 s,同时分区结果充分结合了折射率曲线的边界,并且把亮度和折射率曲线大幅变化的氩弧部分都划分在中央氩弧区域,体现了算法的准确性和优越性。

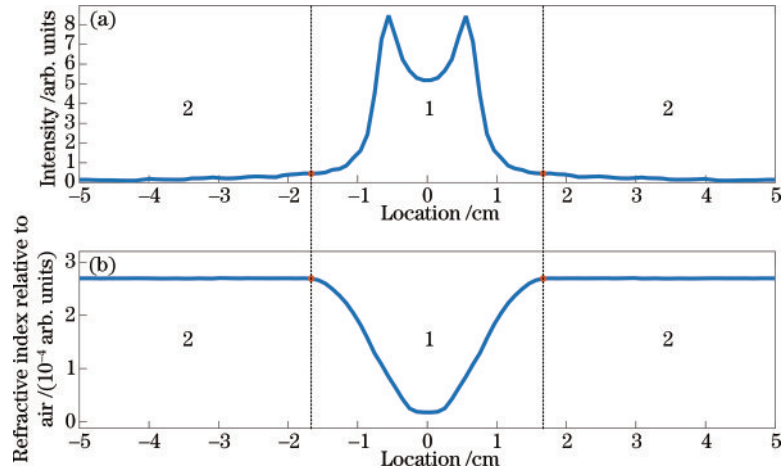


图 10 氩弧等离子体流场的区域划分结果。(a)亮度;(b)折射率

Fig. 10 Result of regional division of argon arc plasma. (a) Intensity; (b) refractive index

### 4.2 丙烷-空气火焰流场

根据 3.2 节的亮度和折射率的边界寻找结果,得到丙烷-空气火焰流场的区域划分结果,如图 11 所示。

由图 11 可以看出,根据亮度和折射率分布曲线可以将丙烷-空气火焰流场划分为 4 个不同的区域。与之前的人工观察相比<sup>[25]</sup>,本文提出的流场边界寻找算

法计算时间为 0.279773 s,同时分区结果充分结合了折射率曲线的边界,并且把折射率曲线两侧区域中大幅变化的高温低亮度部分单独划分为一个区域,与周围低温低亮度的空气区域区别开来,体现了本文算法的准确性和优越性。

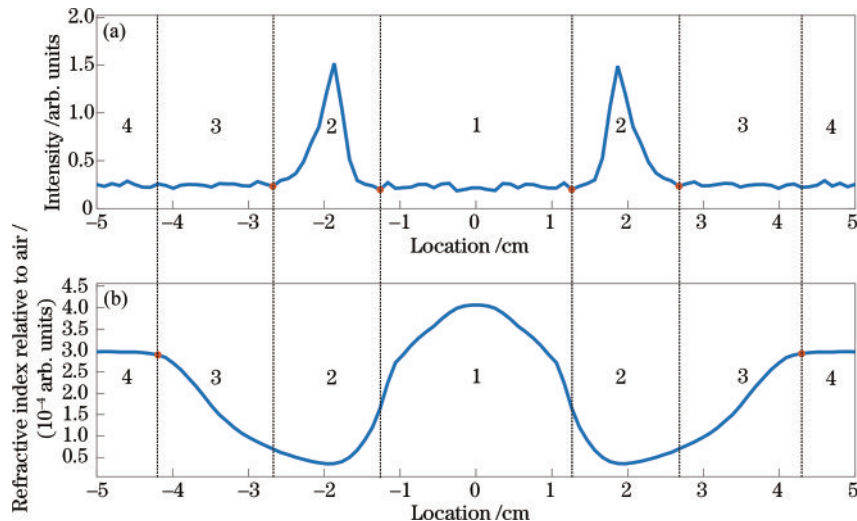


图 11 丙烷-空气火焰流场的区域划分结果。(a)亮度;(b)折射率

Fig. 11 Result of regional division of propane-air flame. (a) Intensity; (b) refractive index

## 5 结论

为解决莫尔层析技术测量高温复杂流场关键物理

参数时流场成分确定的重要问题,提出了一种自动寻找边界算法对高温复杂流场进行区域划分。相比传统的观察相关参数的突变位置点,节省了人工确定的时

间并消除了人眼造成的误差。针对流场的单峰和多峰的不同结构,分别对氩弧等离子体流场和丙烷-空气火焰流场成功地进行了不同区域的边界点的确定,在此基础上实现了区域划分。结果表明,边界寻找算法可以大幅提高高温复杂流场区域划分的计算效率和准确度,为未来的高温复杂流场的物理参数反演问题提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Y Y, Gu F, Cao Z L, et al. Analysis of the physical nature of refractive index gradient in flow fields characterized with moiré tomography[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 152-156.
- [2] Wang J, Guo Z Y, Nie L, et al. Moiré tomography for the diagnoses of flow fields with consideration of ray propagation[J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 251-258.
- [3] Yan D P, Liu F, Wang Z D, et al. Moire tomography by ART[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2861: 146-150.
- [4] Kafri O. Noncoherent method for mapping phase objects [J]. *Optics Letters*, 1980, 5(12): 555-557.
- [5] Guo Z Y, Wang J, Zhu Y, et al. Dynamic phase retrieval for fringe image processing in moiré tomography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11249: 1124921.
- [6] Chen Y Y, Xu M, Cheng W H, et al. Phase information extraction for moiré fringes based on multiresolution analysis[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(12): 3543-3550.
- [7] Yao W, He A Z. Application of Gabor transformation to the two-dimensional projection extraction in interferometric tomography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(2): 258-263.
- [8] 姚卫, 吴东楼, 王振东, 等. 改进的多重网格法重建含遮拦物的干涉波前[J]. *光学学报*, 1999, 19(2): 171-180.  
Yao W, Wu D L, Wang Z D, et al. Wave front reconstruction from opaque object containing interferogram using modified multigrid algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(2): 171-180.
- [9] Stricker J. Analysis of 3-D phase objects by Moire deflectometry[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(20): 3657-3659.
- [10] Chowdhury S, Eldridge W J, Wax A, et al. Structured illumination microscopy for dual-modality 3D sub-diffraction resolution fluorescence and refractive-index reconstruction [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(12): 5776-5793.
- [11] Sentis M P L, Onofri F R A, Lamadie F. Photonic jet reconstruction for particle refractive index measurement by digital in-line holography[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 867-873.
- [12] Vest C M. *Holographic interferometry* [M]. New York: Jone Wiley & Sons, 1979.
- [13] 温学达, 刘钊, 周惠君, 等. 利用迈克耳孙干涉仪重建蜡烛火焰温度场[J]. *物理实验*, 2007, 27(6): 44-47.  
Wen X D, Liu Z, Zhou H J, et al. Reproduction of the temperature field of candle flame using Michelson interferometer[J]. *Physics Experimentation*, 2007, 27(6): 44-47.
- [14] Tieng S M, Lin C C, Wang Y C, et al. Effect of composition distribution on holographic temperature measurement of a diffuse flame[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(4): 477-488.
- [15] Faris G W, Byer R L. Beam-deflection optical tomography of a flame[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(3): 155-157.
- [16] Chen Y Y, Zheng G G, Gu F, et al. Flow field's temperature partition reconstruction based on its phase distribution[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(10/11): 2501-2505.
- [17] Chen Y Y, Wang J, Wang Q H, et al. Integrating Moiré and emission tomography to visualize and diagnose high-temperature flow fields[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2721-2723.
- [18] Edwards A W F, Cavalli-Sforza L L. A method for cluster analysis[J]. *Biometrics*, 1965, 21: 362-375.
- [19] Minkowski H. Criticisms and discussions: time and space [J]. *The Monist*, 2014, 28(2): 288-302.
- [20] Hartigan J A. Statistical theory in clustering[J]. *Journal of Classification*, 1985, 2(1): 63-76.
- [21] Lally E, Gong J M, Wang A B. Method of multiple references for 3D imaging with Fourier transform interferometry[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17591-17596.
- [22] Arines J, Ares J. Linear Squares modal estimation of wrapped phases: application to phase unwrapping[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4829: 178-179.
- [23] Lell M M, Kachelrieß M. Recent and upcoming technological developments in computed tomography: high speed, low dose, deep learning, multienergy[J]. *Investigative Radiology*, 2020, 55(1): 8-19.
- [24] Chen Y Y, Zheng G G, Yu Y, et al. Diagnosis of arc plasma jet flowing into air by integrating Moiré and emission tomography[J]. *Optics Communications*, 2014, 315: 183-187.
- [25] Chen Y Y, Huang X G, Wen Y, et al. The diagnostic study of optical tomography for high-temperature flow fields in the open system[J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 21-26.